資 料

わが国の遮蔽研究の現状

遮蔽研究専門委員会の報告

遮蔽研究専門委員会*

*Some Topics from Activities of Special Committee on
Radiation Shielding in Japan*

By Special Committee on Radiation Shielding

A summary is given on the activities of the "Special Committee on Radiation Shielding" in the two years from its establishment in May 1964 to its dissolution in March 1966. The review covers the past and present status of studies undertaken and problems that remain to be done.

ま え が き

1964年5月に発足した遮蔽研究専門委員会(以下本委員会と称する)は、本年(1966年)3月をもって終了した。この間16回の会合を持ち、委員および参加者による熱心な討論が行なわれた。これらの討論の概要を報告し、今後の研究活動の資料とするため本稿を起草した。

本委員会で討議された主題は、(1)諸外国の研究の現状調査と検討、(2)各論、(3)わが国の最近の研究の成果と展望、の3部に大別される。

第1部では本委員会の発足時に前後して遮蔽研究者にとり極めて重要な2つの国際会議——原子炉遮蔽パネル会議(ウィーン)⁽¹⁾および第3回原子力平和利用国際会議(ジュネーブ)——が開催された。前者に提出された各国の論文を3回にわたり、後者に提出された各国の論文を2回にわたり討論した。これらの論文に表われた各国の遮蔽研究の現状については、それぞれの担当者が取りまとめ、『原子力工業』誌上に特集として掲載された⁽²⁾。高速炉開発がわが国の原子力開発の重要なテーマになりつつあることから、各国の高速炉遮蔽の現状を議題とした。その際の調査討論を中心として、担当した委員が取りまとめ、『原子力工業』誌上に特集として掲載された^(2a)。

第2部の、本委員会で討議された各論的なテーマの主なものは、つぎのとおりである。(1)γ線の多重層透過、(2)多重層中の高速および熱中性子束分布、(3)捕獲γ

線とその遮蔽、(4)遮蔽研究における計測の問題、(5)原子力船遮蔽モックアップ実験計画、(6)加速器の遮蔽、(7)2次遮蔽の問題点、(8)アルベド、スカイシャインに関する問題点、(9)ダクトストリーミング。

これらのテーマのうち、一部はすでに個人名で総説またはショートノートとして本「会誌」上に掲載されたものもあり、掲載を予定されているものもある⁽³⁾⁽⁴⁾。

折よく本学会「昭和41年年会」(1966年3月)において遮蔽研究関係の総合講演を行なう機会を与えられた。本委員会のしめくりとして、われわれの活動の反省と展望を行なうため、小委員会**を構成し、数度の会合を行ない、総合講演原稿の起草を行なった。2回の委員会の検討を経て田中委員が総合講演を行ない、かつ誌上掲載可能の体裁をととのえた原稿を作製した。本報告書はこの講演のために起草された原稿に加筆編集を行なったものである。

-
- * (主査) 兵藤知典,
(幹事) 大島正幸, 中田正也, 新藤 満夫
(委員) 阿部 進, 梅田 巖, 大野博教, 岡島暢夫,
片岡 巖, 金森善彦, 北爪光幸, 島村 光,
田中義久, 田村幸三, 鶴尾 昭, 豊田行雄,
永原照明, 八谷雅典, 布施卓嘉, 古田 悠,
宮坂駿一, 矢島 明, 八巻秀雄
(常時参加者) 安藤恵成, 伊藤泰義, 金井康二,
河野 汀, 竹内 清, 播磨良子, 東原義治,
丸山隆司, 宮越淳一, 山路和雄, 古川芳徳,
山本守之, 森 晃一

** 田中, 梅田, 北爪, 布施, 鶴尾の各委員で構成。

I. 遮蔽研究の問題点

「放射線遮蔽」とはいかなる学問であろうか。歴史的にみれば、対象とする放射線源によって、あるいは関連分野の発展により、中心課題はかなりの変化をしている。現在のわが国では、原子力産業の発展に貢献する原子核(力)工学の一分野として、遮蔽研究を正しい方向に推進する必要がある。

歴史的に見ると、アメリカ、イギリス、ソビエト等でも初期の研究用原子炉の遮蔽は必要な設計データが不十分だったので、必要以上の厚さの遮蔽体を用い、もし不足の場合はコンクリートブロック等の補充を行なうことで解決した。アメリカのオークリッジで、遮蔽研究の目的で Lid Tank Shielding Facility および Bulk Shielding Facility が建設された頃から、各国で熱心に遮蔽研究が開始された。これは高出力、高中性子密度の実験炉や動力炉の実用期に入り、間に合わせ的な遮蔽では建造費がかさむこと、宇宙開発や原子力船の建造には遮蔽が最も重要な要因の1つとなることなどの外的要因と、中性子および γ 線の物質中の挙動に関する研究が進み、必要な線源と計算機が使用可能となって来たことの内的要因により、1つの分野が出来たものと考えられる。

遮蔽研究には、現在どのようなテーマが取り上げられ、また将来取り上げられるべきであろうか。簡単に遮蔽研究全体のサーベイをしてみよう。研究の範囲を明確に分けることは困難であるが、

(1) 中性子および γ 線と物質との相互作用に関する物理学とその応用の分野——基礎研究

(2) 原子力開発研究の分野——開発研究

の2つに大別してみる。現在最も重点がおかれて研究されているテーマは、多くの場合この両者に関するもので項を改めて列挙する。もちろん遮蔽研究の体制にも重要な問題があるが、この点については本報告書の最後で考えてみることにする。

1. 基礎研究

基礎研究の中心課題は、比較的簡単な幾何学的条件の下に物質中で放射線がいかに減少するかという問題である。

多くの場合、原子炉遮蔽を対象とするから、放射線は中性子と γ 線である。人工衛星宇宙船等の設計には、高エネルギー陽子、電子も対象となることがある。また高エネルギー加速器であれば、その加速された粒子および2次放射線(100 MeV 程度の中性子が多い)が対象となる。本委員会では、電子線型加速器の遮蔽

を1回取り上げたほかは、対象とする放射線はすべて中性子と γ 線であった。

(1) 中性子および γ 線と物質との相互作用

中性子および γ 線と物質との個々の相互作用については、過去数十年間に核物理学の中心課題の1つとして取り上げられたことがあり、かなりのデータが集積されている。これらは、われわれの観点からいえばミクロなデータとして非常に重要である。最もデータの不足しているのは中性子の非弾性散乱である。この反応は原子番号の大である物質に対し非常に重要な役割をする。

(2) マクロな諸定数

われわれが対象とする厚い物質壁の中性子や γ 線の透過では、多重散乱が行なわれる。すなわち、マクロな立場で現象を見なければならぬ。われわれの分野で重要な役割を占めるのは、 γ 線の物質透過に関するマクロな定数である質量減衰係数およびビルドアップ率、アルベド、中性子の除去断面積、減速拡散の組定数である。

質量減衰係数は、われわれの使用に十分な精度で求められ⁽⁷⁾⁽⁸⁾、実験とも非常によく一致している。モーメント法により無限媒質に対する物質中の γ 線のスペクトルおよびビルドアップ率が Goldstein ら⁽⁹⁾によって計算された。このデータは現在に至るも非常に有用である。有限な厚さの物質に対するビルドアップ率は、モンテカルロ法および実験により決定されたが、充分ではない。

高速中性子の透過に関する除去断面積はすでに多くの物質に対し、実験により求められている。最近物質中の中性子スペクトルの測定が行なわれるようになり、エネルギー群ごとの減弱距離も測定されるようになった。

(3) 計算法

中性子および γ 線の物質透過の現象を理論的に記述し、データを求める方法には、ボルツマンの方程式を解く方法、除去-拡散法、モンテカルロ法、レスポンス行列法が早くから行なわれている。

a. ボルツマンの輸送方程式

中性子および γ 線のマクロな物質透過はボルツマンの輸送方程式で表わすことができる。断面積その他の基礎定数が知られており、必要な境界条件でボルツマンの輸送方程式の解を求めることができれば問題はないのであるが、簡単に解が得られない。このため簡単な幾何学的条件に対し、モーメント法その他の近似解を得る方法が開発された。そのうちで無限均一媒質中

の γ 線および中性子の透過の問題に対するモーメント法の適用は非常な成果をあげ、その計算結果は現在でも非常に有用なデータとして使用されている。

最近各国でボルツマンの輸送方程式の厳密解を計算するコードの開発も積極的に行なわれている。

b. モンテカルロ法

中性子および γ 線と物質との相互作用は確率現象であるので、モンテカルロ法の適用が可能である。 γ 線の後方散乱の問題はモンテカルロ法の適用の最も成功した例の1つである。 γ 線および中性子の層状物質の透過に対しては、良好の結果を得た。これらのデータは現在でも非常に有用である。深い透過、ダクトストリーミング等の問題に関しては、そのままでは必ずしも十分な精度が得られていない¹⁰⁾。

c. 除去-拡散法

線源から放出された高速中性子の最初の衝突までを除去断面積を用いた指数関数的な減衰とし、以後を多群拡散方程式を用いて物質中の中性子分布を求める除去-拡散法が遮蔽設計計算法として、かなりの成功をおさめている。

d. その他の計算方法

モーメント法、モンテカルロ法、除去-拡散法以外にも、レスポンス行列法、invariant imbedding 法等の適用が成果をあげている。

(4) 線 源

小は1mCi以下の γ 線密封線源から、大は原子炉に至る種々の線源が用いられる。代表的なものは点等方線源、点一方向線源(コリメートされたビーム)、Lid Tank Shielding Facility、水泳プール型原子炉などが多く使用されて来た。今後も実験ではこれらの線源を専ら使用すると共に、線型加速器のような高出力線源等も必要とすることがあろう。逆に低出力であっても単色の中性子等を必要とすることもあるであろう。また、原子炉および加速器によるパルス中性子も必要とするであろう。

(5) 測 定 器

実験を行なう場合の測定器は、ほとんど全部が核物理用および保健物理用として開発されたものである。遮蔽研究で測定するのは中性子および γ 線で2次放射線を計測すること、線束または線量が非常に強い所から非常に弱い所までであること、いままでの多くの測定は線量分布であったが今後はスペクトル空間分布の測定も要求されるであろうことなどから、かなりシビアな条件の下にある¹¹⁾。いままでの測定には電離箱、放射化法、化学線量計、G.Mカウンタ、BF₃カウンタ、シ

ンチレーションカウンタ、写真フィルムなどが多く用いられたが、今後、半導体カウンタ、ガラス線量計なども大いに活用されるであろう。

(6) 計算結果と実験結果との対比

実験および計算は、それ自身独立したデータを得るために行なわれることもあるが、初めから他を意識して相互の対比をし、計算データ、入力データ、測定器の特性の妥当性をチェックすることがよく行なわれる。この場合、両者で採用した幾何学的条件が異なっている場合は幾何学的に、あるいは減衰核法などで変換が行なわれる。

2. 開 発 研 究

原子力工業の発達、原子炉の開発の進展は日進月歩である。遮蔽設計においても過去の経験を充分生かすと共に、基礎研究、関連分野の研究成果を絶えず注目して設計に取り入れて行くことが必要である。また、開発研究では、経済性が重要な要素の1つとなる。

放射線の物質中の挙動は、その物質に固有なものであって、適当な資料の選択による小型化した模型実験を行なうことは不可能である。したがって、実物の原子炉遮蔽の一部とほぼ同様の試料を用いるモックアップテストも必要となる。

(1) 原子炉遮蔽設計上の問題

遮蔽を設計上から考えると放射線防護設計の1分野であり、機器構造設計、建設、安全性対策と密接な関係にある。これら3つの関連分野の設計基準や設計方針によって非常に影響を受け、その大きさ、重量、コストが大きく変わり、経済性に与える影響は大きい。原子力の経済性が問題になればなるほど、その重要性は増して来ている。

開発研究での設計は、わからないではすまされないものであって、対象としている原子炉の各設計段階に応じた計算と実験がその重要度や緊急度に従って計画され、実施される。遮蔽設計においてもその例外ではない。その計算と実験に遮蔽基礎研究の成果が反映されると同時に、遮蔽研究の新しい対象を提供する母体ともなっている。ここに、遮蔽設計法の改良と遮蔽研究の促進とは相互に原因と結果となり、発展するものである。実際に自国で自主的に原子炉を開発している国では、独自の遮蔽設計法と遮蔽理論を生み出していることに注目しなければならない。

(2) 近似計算法、設計コードの開発

さらに、遮蔽設計法においては、要求されるあらゆる問題を必要とする精度で経済的に実施できるものであることが必要であろう。この点で基礎的な遮蔽研究

の成果をその精度を失うことなく簡易計算法やグラフ化等の経験法則化しておくことが必要であり、さらに原子炉設計の各段階(基本計画, 基本設計, 詳細設計)で要求される程度に応じた遮蔽設計法を開発し、コード化しておかなければならない。これらの近似計算法および設計コードの精度をチェックし、改良して行かねばならない。

(3) 遮蔽設計に必要なデータの測定,

計算コードの集積

遮蔽設計に必要なデータは非常に膨大な量である。遮蔽に関する教科書, 参考書, 資料集もかなり出版されているが^{(11)~(13)}, これだけではすべての資料を網羅しているわけではない。アメリカのオークリッジ国立研究所に Radiation Shielding Information Center (RSIC) が 1963 年に設置された。わが国でも数個所の研究機関が登録し情報の交換を行なっている。RSIC では各国の各研究機関で開発された計算コードの集積と共にテストランも行ない、各コードの精度の比較検討をしている。

(4) モックアップ・テスト

遮蔽の開発研究として欠くことのできないものにモックアップテストがある。例えば、水泳プール型原子炉を用いて実際の規模に近い遮蔽の一部を試料として、中性子と γ 線の透過、ダクトストリーミング等の実験を行なうものである。実際的な不規則形状の遮蔽体に対する遮蔽計算コードが確立していないので非常に重要なことである。このような技術的な問題は科学論文としてまとめにくく、多くの場合は学会誌上には掲載されない。各国では膨大なデータの量となっていると思われるが、これからわが国の必要な資料を選択することは不可能に近い。したがって、われわれは必要とするモックアップ・テストを自らの手で行なわねばならない。遮蔽設計の必要がある限り、モックアップ・テストは必要であり、必要に応じて直ちに実施できるようにしておかねばならない。

(5) 遮蔽材料の研究

遮蔽体を多重層にし、あるいは適当な混合物を用いることにより、その物質の遮蔽体として有利な特徴を生かすことが重要である。コンクリートの骨材として用いる場合には、その地方に産出する鉱石の放射線に対する特性を充分知っておく必要がある。材料の選択, 施工のいかんは原子炉施設の経済性に大きな影響を与える。その他、高温, 放射線損傷に対する研究等の他分野の基礎的な研究の成果を自由に駆使しなければならない。

(6) 経済性の追求

建設費の節約という至上命令に対処した開発研究が考えられる。

a. 遮蔽体の建設費の最適設計

より正確なデータを用いることにより安全係数を小さくし、種々の材料を組み合わせ、2次遮蔽を考える、施工性を考える等、建設費をパラメータにとった最適設計をする。

b. 遮蔽体重量の最適設計

特に宇宙開発や原子力船では、遮蔽の重量が価格にひびいてくる。このため重量の減少が重要となり、この方面での最適設計を要求される。

c. プラント全体の経済性の追求の影響

原子力プラント全体の経済性の追求からも遮蔽設計は大きな影響を受け、これに対応する開発研究が必要となる。

3. 現在各国で行なわれつつある主な研究テーマ

各国で実施されている研究テーマは、これらの基礎研究および開発研究のいずれかの部分、あるいはこれらの部分にまたがったものが大部分である。

(1) 多重層透過

高速中性子の吸収断面積は小であるので、大部分の中性子は減速-吸収の過程をたどる。このためには原子番号の小さい物質が有利である。他方 γ 線に対しては、密度の大きい物質が線減衰係数が大である。原子炉のように γ 線と中性子が共存する線源の遮蔽には、これらの放射線に対して特性の異なった物質の多重層を用いることが有利である。このため、こういった多重層の γ 線透過, 中性子透過の問題が研究された。 γ 線に対しては、わが国およびソビエトでかなり重要な研究がなされて来た。

γ 線の多重層透過に関しては、片岡により総説が書かれた⁽⁴⁾。中性子の物質透過についても本委員会での討論の結果をまとめて、本「会誌」上に別に発表する予定である。

(2) ダクトストリーミング

原子炉遮蔽はダクトを有する場合が多い。このダクトを通して出て来る中性子および γ 線は、遮蔽体を透過して出て来る中性子および γ 線に比して無視し得なくなる。このためダクトストリーミングの研究が重要となり、理論的実験的な多くの研究が行なわれている。

中性子および γ 線は、固・液層では減速吸収で大きく減衰するが、気層中ではほとんど距離的な減衰だけにしか期待できないので、この固・液層中の一部に気層、

すなわちダクトがあると、そこを通る放射線はその部分で他と比較し減衰が少ない。この最も一般的で典型的なものが、遮蔽体のダクト中で起るダクトストリーミング現象であり、遮蔽体中の配管問題として常に遭遇する。最近のように遮蔽体が一体化して来ると、外面の放射線量がダクトからの洩れの量で規定されるようになって来るので、遮蔽設計面からも重要性が増して来た。物理的にはダクトストリーミングには3つの成分がある。

- (1) Direct component: 線源から直接ダクトを通して素通りして来るもの
- (2) Albedo component: 線源から一たんダクト壁に入り反射されて出て来るもの
- (3) Leakage component: 周辺の媒質からダクト中に洩れ入ってそのまま出てくる。

(2), (3)の成分はダクト中でさらに多重散乱される。

(3) 後方散乱

原子炉本体の遮蔽には、後方散乱はあまり考えなくてもよいが、ダクトストリーミングと深い関係を有している。船舶、照射、装置等の設計の場合には、後方散乱を考えなければならない。 γ 線の後方散乱の研究は、わが国、アメリカ、ソビエト等で行なわれて来た。今後もダクトストリーミング、多重層透過等の関連において、また遮蔽設計的な見地からも研究を続けるべきであろう。中性子の後方散乱に関してはあまり多くの研究がなされていない。 γ 線の後方散乱に関しては兵藤により総説が書かれた⁽⁶⁾。

(4) 捕獲 γ 線とその遮蔽

数個の原子番号の小である元素を除き、中性子を原子核が捕獲した場合には、捕獲 γ 線を放出する。水素等の特殊な元素を除き、中性子結合エネルギーは6～8 MeVである。カスケードに転移が行なわれて数個の2～3 MeVの γ 線を放出する場合もあるが、5～8 MeVの高エネルギー γ 線を放出する場合も多い。したがって、中性子の遮蔽を考えるにあたっては、捕獲 γ 線に対する考慮が必要となる。逆に捕獲 γ 線を推定するには、遮蔽体を構成する物質と遮蔽体中での中性子束分布を推定する必要がある。

(5) 2次遮蔽

動力炉の遮蔽では、炉心の遮蔽と熱交換器等の遮蔽とを分離することによりコストを下げていく場合が多い。何を対象とし、どこに2次遮蔽を置くべきかは、基礎研究での種々のデータおよび計算法で推察しなければならない。

(6) スカイシャイン

大型原子炉および大型加速器では、上方に抜けた放射線が空気中の原子の散乱により施設外の線量に影響を与える。わが国のように人口稠密な地区の多い国では、敷地の選定にからみ特に問題が多いであろう。

(7) 不規則形状への対策

多くの場合、基礎データが得られた幾何学的条件とは異なった条件で設計が行なわれる。このため、どのようにデータ補正を加えるか等に対し、研究が必要であるが、あまり多くのデータは発表されていない。

Ⅱ. 本委員会設置以前のわが国の遮蔽研究の概要

わが国において遮蔽研究がどのように行なわれて来たかについては2,3の文献があるが⁽²⁰⁾⁽²¹⁾、簡単にふり返ってみよう。

わが国の遮蔽研究者がこの分野の研究にたずさわるに至った動機は種々である。原子炉、原子力船の設計にたずさわった者、特にこの分野に関心をもっている研究機関、会社等に所属する者、放射線と物質との相互作用に関心をもち、物理学と工学との中間領域としてこの分野に関心をもった者等である。

石川らにより国産1号炉(JRR-3)の設計計算がなされた当初は、電子計算機の使用が不可能であり、計算法もデータもすべて外国のものによっていた⁽²²⁾。

わが国に電子計算機が導入されて以来、遮蔽計算コードに対する研究者の関心が強まり、原子力船の建造計画の具体化によりさらに強まった。本学会に「計算コード専門委員会」が設置され、しばしば遮蔽計算コードが取り上げられた。日本原子力船研究協会でも遮蔽研究を強力に取り上げるに至った。RACコード等の自主的な遮蔽計算コードの開発、外国コードの消化が、これらに参加した人々を中心に行なわれた^{(23)～(25)}。

わが国では原子炉の建設がアメリカ、イギリス、ソビエト等より遅れたため、遮蔽の実験的研究は、主として γ 線の透過散乱について行なわれ、かなりの成果をあげた。中性子の物質透過の実験的研究は、本委員会の発足とはほぼ同じ時期に出発した。また原子力船の遮蔽設計のため、データの広範囲なサーベイおよびJRR-4の設計が行なわれた^{(25)～(27)}。

本委員会が発足する以前に行なわれた、理論的および実験的研究をテーマ別に分類すると、つぎのようになる。

- (1) 計算コードの開発
- (2) γ 線の多重層透過
- (3) γ 線の後方散乱

- (4) 中性子の多重層透過
- (5) ダクトストリーミング
- (6) 不規則形状物効果
- (7) 計測
- (8) その他の問題

これらの研究テーマのかなりの部分は、本委員会発足後も引き続き実施されている。本学会の「年会」および「分科会」において、「遮蔽」が部門として独立したのは「昭和38年年会」からである。それ以前にも多くの研究発表が行なわれたが、残念ながら他の部門の一部に含められていた。

Ⅱ. わが国の遮蔽研究の成果

わが国の遮蔽研究は、不十分な設備、環境のもとで、最大限の成果を挙げるべく研究者達が精力的な努力をしてきた。ここでは、その具体的な成果はどのような形で現われたかを見てみよう。

基礎定数ははっきりしていること、実験が比較的容易にできること、計算時間もあまりとらないことから、わが国の遮蔽研究は、まず γ 線の透過、散乱の基礎的な問題で大きな成果を挙げた。多重層透過と後方散乱の問題点を理論、実験の両面から解明することに集中し、さらに複雑な形状(ダクト、不規則形状物)の透過散乱問題へと進んでいる。

研究用原子炉の利用、すなわち中性子線源が利用できるにつれて、中性子の多重層、ダクトストリーミングの研究が始まり、徐々に成果を挙げつつあるが、まだその緒についたばかりであり、中性子線源利用の一般化に伴ってこの面での研究は今後大きく進展しようとしている。さらに、原子力第1船建造に伴う遮蔽研究開発が新しい研究体制で組織的に開始された。

1. γ 線の物質透過

数年前遮蔽設計時に多重層透過のビルドアップ率をどう評価するかという問題が提起された。当時教科書では、各層のビルドアップ率の積という形で評価していたが、これは非常に過大評価になることが指摘された。一方アメリカでは、モンテカルロ法による計算により多重層のビルドアップ率が、重い物質、軽い物質の組合せ順序でかなり差があらわれることが確認され、Kalosの半経験式の形に整理された。ソビエトでは、放射性同位元素による系統的な多重層組合せ実験を行ない、多重層透過ビルドアップ係数のBroderの実験式の形に整理された。わが国においても、ほとんど同じ頃に実験が計画され開始された。問題になったのは、つぎのとおりである。

(1) 実験

a. 原子番号の小である物質の後に原子番号の大である物質を置いた場合とその逆の場合とでは、両媒質の多重散乱 γ 線のスペクトルの相違から、ビルドアップ率の変化が当然起る。これを測定により確認し、実験式を求めた。現在までに行なわれた研究を参考文献28~35に示す

(2) 計算

基本的な計算コードが各研究者により整備されると共に、応答マトリックス法、近似計算法、Invariant Imbedding法などによる計算が試みられた。わが国で開発された γ 線の物質透過計算コードを参考文献36~43に示す。

今後に残されている問題点

- (1) 多重層物質中の多重散乱 γ 線のスペクトルと角度分布を正しく評価すること。
- (2) 10 m.f.p. 以上の厚い透過(~20 m.f.p. 程度まで)および高エネルギー領域 γ 線の多重層ビルドアップ率の実験測定および理論計算の実施と経験式化すること。
- (3) 実験、計算対象を実用な物質全般に拡大すること。

2. γ 線の後方散乱

有限または半無限大物質、または真空の境界面に接して他物質がある場合、他物質により散乱された γ 線がまたその物質に入射して来る現象である。

わが国でも、後方散乱 γ 線のエネルギー・スペクトル、角度分布の測定より、微分アルベド、アルベドが測定された。この結果はよくモンテカルロ計算およびinvariant imbedding法による計算と一致している。わが国における γ 線の後方散乱の研究を参考文献44~50に示す。

今後に残されている問題点

- (1) ある場所への入射 γ 線が他の場所から出て来る場合のエネルギー・角度分布を明らかにすること。これはダクトストリーミングへの応用の場合に重要である。
- (2) 高エネルギー γ 線に対する実験測定
- (3) 有限層、薄い層の2, 3層からの後方散乱 γ 線の測定、計算

3. 中性子の物質透過問題

わが国では、まずアメリカ、イギリス両国の中性子透過の理論の消化とこれのコード化から始まった。除去理論と拡散理論との組合せによるイギリスRASHコードを手本にし、18群の高速中性子除去領域とその

おのおのに直結する拡散領域6群中性子減衰, 炉心からの1次 γ 線減衰, 中性子捕獲に伴う2次 γ 線減衰, 発熱の4つを1つに組み合わせて RAC コード⁽²³⁾を開発した。この RAC コードは多くの遮蔽設計計算に利用されている。2,3年前から中性子線源の利用が各所で出来るようになるにつれて, この RAC コード計算と実験との比較検討が開始され, 計算, 実験両面に多くの問題が提出された。やっこの面で信頼のおける RAC コードの完成へと第1歩がふみ出されたといえよう。ほかにボルツマン方程式を厳密に解くコードも作られつつある。報告された実験を参考文献(51)~(55)に, 計算を(56), (57)に示す

今後に残されている問題点

(1) RAC コードの徹底的な検討

基礎定数の選定

深透過問題への適用(線量, フラックスの減衰特性)

非含水素物質への適用(熱外中性子束)

(2) 遮蔽体洩れ中性子のエネルギー角度分布

(3) 熱外中性子捕獲 γ 線, 非弾性 γ 線評価

(4) 厳密解法の研究

(5) 近似計算法の開発

(6) 船用炉, 新型転換炉, 高速炉遮蔽全般への適用

4. ダクトストリーミングの問題

わが国での最近の研究も, ある程度第I章で述べた方向に沿ってなされている。 γ 線のストリーミングについてはモンテカルロ法, 多重散乱法による厳密な取扱いが実施され, ダクト壁各部から反射する γ 線の出口 γ 線への寄与をスペクトル, 個数, 線量にわたって明らかにし, また, ^{60}Co , ^{137}Cs 線源による実測と比較し, 良好な結果を得ている。中性子についてはリドタンクを使用して水中の各種試料の中空パイプ中の速中性子, 熱外中性子, 熱中性子を測定し, 興味深い結果を得ている。

参考文献(58)~(60)にこれらの研究を示す。

今後に残されている問題点

(1) アルベド, 洩れ放射線等エネルギー角度分布の基礎現象の解明

(2) 年齢, 拡散理論の適用モデル等近似計算法の開発

(3) 厳密解法の促進

(4) 遮蔽体およびダクトの複雑なものに対して実験データの蓄積と半経験式の導出

5. 計測の問題

遮蔽に関する計測には, 多くの場合線量測定が行な

われてきた。これは同一測定器で測定しうる線量の範囲が大であること, 設計の基準となる数値の単位が rem で表わされることが多い等の原因による。最近この方面の研究が進歩するに従い, 物体中の中性子, γ 線のスペクトルおよび角度分布を知る必要も起って来た。

特殊な測定, 容易な幾何学的条件で測定したデータをより一般的な幾何学的条件にするために, 幾何学的条件の交換が行なわれる。このため, しばしば γ 線用として長い円筒状電離箱が用いられた^{(68), (67)}。

入射 γ 線が単色であっても, 透過 γ 線のうち多重散乱 γ 線は連続スペクトルをなす。NaI(Tl) シンチレータで連続スペクトル γ 線を測定するには, 波高分布からエネルギー分布への変換を必要とする。わが国でもいくつかの大きさについて, レスポンス行列が求められた^{(69)~(70)}。中性子に対して有機シンチレータが使用可能である。物質中の中性子のスペクトル空間分布の測定に対してソビエトにおいて現在使用されているが, わが国でも準備が完了して測定が開始された。

有機シンチレータで γ 線線量の測定をする場合, パルス波高にパルス数を掛けた量の集計が必要である。これに対し非常に便利な測定回路が開発された⁽⁷¹⁾。

今後に残されている問題点

(1) 測定器の充実

(2) 新しい測定器, 測定法の開発

(3) 他分野で使用している測定器の導入, 習熟

6. 線源の問題

(1) 体積線源

最近まで体積線源の計算を容易にするため, 等価平面線源を考えていた。これを計算容易な球殻, 円柱と置換することで計算が容易になった^{(72), (73)}。

(2) 水中における光中性子束分布

炉心周辺の水の中における光中性子束の計算が行なわれた⁽⁷⁴⁾。

7. 開発研究

わが国の開発研究は比較的少ない。これは JRR-4 が完成後間がないこと, 開発研究は比較的論文になりにくいことなどが原因であると考えられる。

これらの分野の問題の取扱いはほとんど現象的な取扱ひ方に頼っているが, 今後原子力船内の放射線分布や最近のプラント一体化構造の傾向により, その重要性は増加して来るであろう。また, 簡易な形状配置のものについては, 近似計算法あるいはモンテカルロ法等厳密解法の試みも必要になって来ると考える。

この方面では, 船舶技研の MARINE コードの開

発⁽⁷⁵⁾や⁶⁰Coによる実船測定⁽⁷⁶⁾があり、両者の比較等も行なわれているが、興味ある問題も提起されており今後の展開に期待したい。また JRR-4 による原子力第1船遮蔽効果確認実験⁽⁷⁷⁾には、不規則構造物効果を調べるモックアップテストも数多く含まれている。

金属管壁を透過するγ線のビルドアップ率の測定は皆無であったので、種々の厚さの鋼管についてビルドアップ率が測定された⁽⁷⁸⁾。

狭い屈曲したスリットからのストリーミングは、過去に多少のデータがあるが、種々の条件で測定が行なわれた⁽⁷⁹⁾。

スカイシャインの計算法⁽⁸⁰⁾や遮蔽体周辺線量分布計算法⁽⁸¹⁾の開発も試みられている。

今後に残されている問題点

- (1) 設計計算用コードの開発
- (2) 遮蔽材料の放射線および熱に対する研究
- (3) 施工法に関する問題
- (4) 経済性を含めた最適設計
- (5) 不規則形状物の遮蔽効果

IV. 遮蔽研究体制の問題

原子力の先進国では、国家の指導の下に原子力開発体制が整えられ、政府出費の研究機関が中心となつて、遮蔽の研究、開発が進められている。いままでのわが国の遮蔽研究は、国家の一貫したプロジェクトがなく、多くは大学、研究所、民間会社の自主的な研究にまかされていた。したがって、研究は小予算ででき、しかもある程度この面での成果を期待できる基礎的な研究テーマにならざるを得なかった。

今後の研究の進め方について、2, 3 の重要な問題について考え、簡単に記してみることにする。

1. 設備の問題

放射性同位元素の利用が一般化し、その入手は容易となり、測定器等は安全なものを得られるようになった。電子計算機の利用も一般化し、IBM 7090, IBM 7044, CDC 3600, その他国産の高速計算機の使用も可能となった。原子炉も各所に建設され、日本原子力研究所では JRR-4 が完成した。

これらを有効に利用すれば、かなりの成果があげ得よう。しかし、計算試料の製作、測定器の整備等にはかなりの費用を要する。このような経済的予算を充分に得なければ、これらの装置の充分な活用は望み得ない。

2. 人の問題

いままでも原子力船研究協会、引続き原子力船開発

事業団、原子力産業会議等で遮蔽研究者の多くが集まることがあったが、広く全国的な視野の下に人が集まる本委員会が設置されたことは誠に喜ばしいことであった。

実際の研究に関しても、今後ますます人の交流を盛んにし、前述の充分な研究費の裏付けを得て、設備と人材の有効な利用を考えなければならない。また新しいこの分野に進む人々を受け入れる余裕を持つことを関係方面に期待したい。

3. 関連分野との提携

遮蔽研究、開発には多くの関連分野がある。この関連分野との中間にもしギャップがあればこれを埋め、より広い視野で研究を進めるべきである。また、これらの関連分野の研究成果を速やかに取り入れ、重複を避け、おのおのの研究の新たな発展のために活用すべきである。

V. 結 語

この報告の1連の考察からいえることは、

- (1) 今後行なわれねばならない遮蔽研究の課題は、基礎研究、開発研究とも数多くある。
- (2) 新しい原子炉の開発は新しい問題を提携し、研究を刺激する。
- (3) 計算では電子計算機、実験では測定設備、測定機器の進歩、充実を必要とする。
- (4) 実験炉、原型炉は、わが国の現状はすべて遮蔽開発研究の対象であり、研究者が経験を持つ絶好の機会である。
- (5) 研究成果は実用炉設計法に有効に取り入れなければならない。
- (6) 原子炉遮蔽以外の放射線遮蔽設計等に対しても積極的に参加することが望ましい。
- (7) 他分野との交流を盛んにし、中間領域の研究を積極的に行なうべきである。

その他委員は多く積極的な意見を有している。これらはまた機会を得て本「会誌」上あるいは原子力関係誌上において述べることにして本報告を終る。

(1966年 8月8日 受理)

— 参 考 文 献 —

- (1) IAEA, Reactor Shielding, *Tech. Rept. Ser. No.* 34, (1964), Vienna.
- (2) 新藤満夫, 古田 悠, 鶴尾 昭, 他: 原子力工業, 10 [12], 5~31 (1964).
- (2a) 新藤満夫, 宮坂駿一, 田中義久, 他: 同 上, 12 [4], 5~33 (1966).
- (3) 古田 悠: 本 誌, 7 [5], 260 (1965).

- (4) 片岡 巖: 同上, 7[11], 634 (1965).
- (5) 北爪光幸: 同上, 7[9], 496 (1965).
- (6) 兵藤知典: 同上, 8[7], 371 (1966).
- (7) G.W.GRODSTEIN: X-ray Attenuation Coefficients from 10 keV to 100 MeV, *NBS Circular* 583. US Department of Commerce, (1957); R.T. McGINNIES: *ibid.*, Suppl. *NBS Circular* 583, (1959).
- (8) C.M.DAVISSON: "Interaction of X-Radiation with Matter, in Alpha-, Beta-, Gamma-Rays Spectroscopy", ed. by K.SIEGBAHN, Vol. I, pp. 37~78 (1965), North-Holland Publ. Co., Amsterdam.
- (9) H.GOLDSTEIN, J.E.WIRKINS, Jr.: Calculations of the Penetration of Gamma Rays, *NYO-3075* (1954).
- (10) 鶴尾 昭: 本誌, 6[9], 523 (1964).
- (11) B.T.PRICE, C.C.HORTON, K.T.SPINNEY: "Radiation Shielding", (1959), Pergamon Press, London, Paris.
- (12) T.ROCKWELL, II, ed., "Reactor Shielding Design Manual", (1956), McGraw-Hill Book Co. Inc., New York.
- (13) H.GOLDSTEIN: "Fundamental Aspects of Reactor Shielding", (1959), Addison-Wesley Publ. Co. Inc., U.S.A.
- (14) E.P.BLIZARD, L.S.ABBOTT, ed.: "Reactor Handbook", 2nd ed., Vol. II-B, Shielding, (1962), Intersci. Publ., New York, London.
- (15) D.L.BRODER, A.P.VESELKIN, YU.A.EGOROV, et al.: 原子炉遮蔽の問題点, (1963), ソビエト国立原子科学工学図書出版, モスクワ, (ロシア語, 日本語訳なし).
- (16) 日本原子力船研究協会: 遮蔽設計資料集, (1963) 非売品.
- (17) 古田 悠, 鶴尾 昭: 放射線遮蔽, 原子炉研修所講義テキストⅡ, *JAERI-Memo* 1363, 79~203 (1964), 非売品.
- (18) T.JAEGER: "Grundzüge der Strahlenschutztechnik", (1960), Springer-Verlag, Berlin.
- (19) 兵藤知典: 放射線遮蔽入門, (1966), 産業図書.
- (20) 原研東海研遮蔽研究準備室: Status Report of Shielding Investigation in Japan, *JAERI* 4029, (1964), 参考文献1, pp. 37~56.
- (21) 宮坂駿一: 日本の遮蔽研究の問題点, 原子力工業, 10[12], 28 (1964).
- (22) 石川 寛, 朝岡卓見, 笹倉 浩: JRR-3(国産1号炉)設計計算, *JAERI-1002*, (1960).
- (23) 日本原子力船研究協会: 原子炉遮蔽計算コードに関する研究, (1961), 非売品.
- (24) 同上: 原子力施設の遮蔽計算(コード化)に関する試験研究, 原船協-33, (1959), 非売品.
- (25) 同上: 原子力船の遮蔽計算コードに関する試験研究, 原船協-45, (1961), 非売品.
- (26) 同上: 遮蔽設計資料集附録諸関数表, 原船協-42-I, (1963), 非売品.
- (27) 同上: 船用遮蔽研究用スイミングプール型原子炉の実験方法および実験装置についての調査研究, 原船協-27, (1962), 非売品.
- (28) 望月博治, 田中義久, 他: 本誌, 4[7], 448 (1962).
- (29) 同上: 同上, 4[10], 703 (1962).
- (30) Y.FURUTA, A.TSURUO, S.MIYASAKA, et al.: *Nucl. Sci. Eng.*, 25, 85 (1966).
- (31) 金森善彦, 横田敏明, 豊田 便: 三井造船技報, No. 45, 20 (1964).
- (32) 宮坂駿一, 鶴尾 昭: 本会「第5回炉物理・第3回炉工学合同分科会」予稿集, p. 66 (1965).
- (33) 梅田 巖, 兵藤知典: 同上, p. 68.
- (34) 西脇 安, 播磨良子: 同上, 本会「昭和40年年会」要旨集, p. 41 (1965).
- (35) 梅田 巖: 本誌, 7[9], 480 (1965).
- (36) 鶴尾 昭: 第2回原子力コード発表会予稿集, p. 166~176 (1965. 10).
- (37) I.KATAOKA, K.TAKEUCHI: *J.Nucl. Sci. Technol.*, 2[1], 30 (1965).
- (38) I.KATAOKA, K.TAKEUCHI: *Paper of Ship Research Inst.*, No. 6, (1965).
- (39) 片岡 巖, 竹内 清: 船舶技研報告, 2, 297 (1965).
- (40) 鶴尾 昭: 本誌, 6[2], 91 (1964).
- (41) I.UMEDA: *J. Nucl. Sci. Technol.*, 1[2], 37 (1964).
- (42) 北爪光幸: 本誌, 7[9], 496 (1965).
- (43) 清水彰直, 水田 宏: 本会「昭和41年年会」要旨集, p. 205, (1966).
- (44) T.HYODO: *Nucl. Sci. Eng.*, 12, 178 (1962).
- (45) H.FUJITA, K.KOBAYASHI, T.HYODO: *ibid.*, 19, 437 (1964).
- (46) 松本高明, 水上紘一, 兵藤知典: 本会「昭和39年年会」予稿集, p. 286 (1964).
- (47) 中田正也: 非破壊検査, 10, 263 (1962).
- (48) 中田正也, 布施卓嘉, 竹内 清: 運研報告, 11, 561 (1962).
- (49) A.SHIMIZU, H.MIZUTA: *J. Nucl. Sci. Technol.*, 3[2], 57 (1966).
- (50) 梅田 巖, 中田正也, 片岡 巖, 他: 本会「昭和38年年会」要旨集, p. 188 (1963).
- (51) 八巻秀雄, 福島 稔, 他: 本会「昭和39年年会」要旨集, p. 291 (1964); 「40年年会」要旨集, p. 42 (1965); 「41年年会」要旨集, p. 207 (1966).
- (52) 同上: 本会「炉物理・炉工学分科会」予稿集, p. 87~88 (1964); p. 64~65 (1965).
- (53) 川本節男, 山田 毅, 他: 本会「昭和40年年会」要旨集, p. 43 (1965).
- (54) 同上: 本会「第4回炉物理・第2回炉工学合同分科会」要旨集, p. 86 (1964).
- (55) 田中義久, 他: 本会「昭和39年年会」要旨集, p. 297~298 (1964).
- (56) 片岡 巖, 竹内 清: 本会「昭和40年年会」要旨集, p. 39 (1965).
- (57) 北爪光幸, 島村 光, 森 晃一: 同上, p. 39.
- (58) 兵藤知典, 奥村 強: 本誌, 3[4], 284 (1961).
- (59) 田中義久, 東原義治: 本会「昭和39年年会」要旨集,

- p.299~230 (1964); 「昭和40年年会」要旨集, p.45~47, 「合同分科会」予稿集, p.67 (1964).
- (60) 八巻秀雄, 福島 穰, 内田俊介: 本会「昭和41年年会」要旨集, p.206 (1966).
- (61) 浅田常三郎, 菊地理一, 野垣内武志, 他: 本誌, 2〔5〕, 245 (1960).
- (62) A. TSURUO, M. SHINDO, M. KAWABATA: *J. Nucl. Sci. Technol.*, 2〔4〕, 121 (1965).
- (63) *ibid.*, 2〔9〕, 325 (1965).
- (64) A. TSURO: *ibid.*, 2〔10〕, 406 (1965).
- (65) H. KAKIMOTO, T. SAIGUSA, S. SHIMIZU: *Bull. Inst. Chem., Kyoto Univ.*, 43, 22 (1965).
- (66) K. TAMURA, Y. KANAMORI, Y. FURUTA: *Japan. J. Appl. Phys.*, 3, 232 (1965).
- (67) 望月博治, 田中義久: 原子力工業, 9〔9〕, 54 (1963).
- (68) T. HYODO, F. MAKINO: *Mem. Faculty Eng., Kyoto Univ.*, 24, 291 (1962).
- (69) 石松健二: 本誌, 4〔1〕, 24 (1962).
- (70) 水上紘一, 兵藤知典: 印刷中, (1966).
- (71) Y. FURUTA, S. KINBARA: *Rev. Sci. Instr.*, 37, 176 (1966).
- (72) H. ÔNO, A. TSURUO: *J. Nucl. Sci. Technol.*, 2〔6〕, 229 (1965).
- (73) A. TSURUO: *ibid.*, 2〔7〕, 261 (1965).
- (74) 田上 嵩, 北爪光幸: 本誌, 8〔1〕, 12 (1966).
- (75) 片岡 巖, 金井 務: 原子力船遮蔽コード, 遮蔽研究専門委員会資料, SRC-1063, (1965).
- (76) 中田正也: 遮蔽研究専門委員会資料, SRC-1064, (1965).
- (77) 日本造船研究協会: 原子力船第1船遮蔽効果確認実験実施方案, (1965).
- (78) I. UMEDA, T. HYODO: *Nucl. Structural Eng.*, 2, 335 (1965).
- (79) 矢島 明, 市島秀恭, 上原由男, 他: 本会「昭和40年年会」要旨集, p.210 (1966).
- (80) 島村 光: 同上, p.48 (1965).
- (81) 北爪光幸: 同上, p.49 (1965).

☆ 本 誌 投 稿 の 手 引 ☆

- 一般投稿は研究論文・資料を原則とし、必ず会員の資格を要する。
- 内容はオリジナルものに限り、暫く刷上り6頁以内(超過の場合には超過分1頁当り実費約4,000円著者負担)とする。和文は「会誌」に、欧文は Journal に掲載される。欧文の場合は修文・添削にとくに充分な考慮を要する。
- 掲載範囲は、原子力研究に関連する凡ゆる部門を含め、とくに限定しない。
- 執筆にあたっては投稿規程に従い、所定の原稿用紙を使用する(欧文は適宜に厚手のタイプ用紙に2段送り、1枚約25行にタイプする。)和・欧文とも所定の原稿表紙を添付する。図面はそのまま製版できるよう必ず墨入れトレースする。
- 投稿希望者は事務局へ連絡すれば、原稿用紙(30枚綴1部100円干別)、投稿規程が送付される。
- 和・欧文を問わず表題・抄録・所属機関名などを和・英両文で適確に書いて添付する。
- 別に締切り日は設けない。原稿受理次第「受理通知」を本人に送る。原稿は当該分野担当の査読委員の査読に回わり、次回以後の編集委員会において採否を審議する。査読通過および掲載巻号は決定次第通知される。
- 論文は査読通過後受理順に掲載される。(掲載まで欧文約1~2ヵ月、和文約4~5ヵ月)
- 掲載論文1篇につき30部まで無料で別刷が贈られる(30部以上希望の時は、1部につき、100部まで標準4頁以内50円、5~8頁60円の実費負担)。
- 査読・審議の結果、内容・文章の短縮・修正、または図面トレースの書直しを要求されたり、時には掲載を遠慮いただく場合があるので、予めご了承ください。
- 特に欧文の修文・添削についてはすべて著者負担とする。(和訳を要求される場合もある)
- 返却原稿は6ヵ月以内に再提出なき場合は撤回とみなされる。
- ショートノート・談話室の各欄は、随時、随意に気軽なご寄稿を歓迎する。
- その他、詳細は事務局へお問い合わせ下さい。